第 41 卷 第 4 期
2023 年 12 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 41, No. 4
Dec., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.04.06

HY2D 卫星星载 GPS 数据精密定轨研究

陶恩哲[1,2]，周旭华[1]，徐可馨[1,2]，曲伟菁[1]，李朵朵[1,2]，李 凯[1]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要： 采用 HY2D 卫星 2021 年 6 月 1 日－14 日和 6 月 19 日－27 日星载 GNSS 主、备份接收机数据，基于简化动力学定轨算法，研究了星载 GPS 精密定轨技术，分析了主、备份接收机性能及其定轨精度。利用主、备份星载 GPS 数据定轨，得到相位拟合残差 RMS 的平均值，分别为 0.69 cm 和 0.82 cm。当轨道重叠 4 h 时，主份接收机径向差异为 0.2 cm，三维位置差异为 0.6 cm；备份接收机径向差异为 0.3 cm，三维位置差异为 1.7 cm，备份接收机结果差异稍大。用法国 CNES 提供的精密轨道检验主、备份接收机数据的定轨精度，发现主、备份接收机定轨结果与法国产品的径向差异平均值分别为 0.8 cm 和 1.2 cm。用站星间高度角大于 20° 的全球 SLR 核心测站观测数据检验主、备份接收机定轨精度，其测距方向残差 RMS 分别为 1.51 cm 和 2.44 cm。研究结果表明，HY2D 卫星搭载的主、备份星载双频 GNSS 接收机都可以满足卫星径向厘米级精度的定轨需求。

关 键 词： HY2D卫星；GPS；主份接收机；备份接收机；精密定轨

中图分类号： P228.4 **文献标识码：** A

1 引 言

2021 年 5 月 19 日，我国在酒泉卫星中心发射第 4 颗海洋二号卫星：海洋二号 D 星 (简称 HY2D)，与 HY2A(2011)、HY2B(2018) 和 HY2C(2020) 一样，属于我国海洋动力环境监测卫星, 主要使命是监测和调查海洋环境，获得包括海面风场、浪高、海面高度等多种海洋动力环境参数，为海洋防灾减灾、海洋权益维护、海洋资源开发、海洋环境保护、海洋科学研究以及国防建设等提供支撑服务[1−4]。HY2D 卫星轨道设计为两个阶段，均运行在回归冻结轨道上，倾角均为 66°。第一阶段卫星寿命前期为海洋观测轨道，轨道半长轴为 7 238.583 km，回归周期为 10 d。第二阶段卫星寿命末期为测地模式轨道，轨道半长轴为 7 329.490 km，回归周期为 400 d。当前 HY-2 系列卫星组成三星 (2B、2C 和 2D) 组

收稿日期： 2023-03-20； **修回日期：** 2023-04-24

资助项目： 国家自然科学基金 (12273096, 12103077)

通讯作者： 周旭华, xhzhou@shao.ac.cn

网观测，全球海洋观测周期从单星情况下的 20 多天缩短到 6 h，全球海洋监测的覆盖能力达 80% 以上，海洋监测的效率和精度大幅提升，达到国际领先水平。除 HY2B 外，其他 3 颗卫星上都搭载了双频 GNSS (global navigation satellite system) 接收机、多普勒测定轨系统 DORIS (Doppler orbitography and radio－positioning integrated by satellite) 和 SLR (satellite laser ranging) 激光反射棱镜，主要服务于精密定轨。三种观测技术获取的 GNSS、DORIS 及 SLR 数据，既可以单独定轨也可以联合定轨[5−9]。三种技术的融合能够带来更丰富的观测信息并克服单一数据缺陷性，在获取稳定、可靠的轨道产品上更具有优势[5,6]，各自独立使用则具有相互标定和验证作用[7−9]。

获取高精度轨道是卫星顺利完成其科学任务的前提和保证。传统的轨道测量技术 (如光学等) 难以实现高精度轨道测定。随着 GNSS 地面跟踪网、观测模型及数据处理方法等不断完善和发展，星载 GNSS 定轨技术逐渐展示其应用潜力，国内外的许多学者在星载 GNSS 定轨方面做了大量工作，开发了众多高精度定轨软件，如瑞士伯尔尼大学天文学院 (Astronomical Institute of the University of Bern, AIUB) 的 Bernese、美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 的 GIPSY-OASIS (GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software)、德国地球科学中心 (Geo Forschungs Zentrum, GFZ) 的 EPOS (Earth Parameter and Orbit System)、武汉大学的 PANDA (Positioning and Navigation Data Analyst)、上海天文台的 SHORDE (Shanghai Orbit Determination) 等。对于海洋二号卫星，上海天文台的 SHORDE 软件不仅可以对 GNSS、DORIS 及 SLR 三种数据联合定轨，还可以实现三种数据单独定轨。当前，运行在国家卫星海洋应用中心的 SHORDE 软件产生的精密轨道产品，与法国国家空间研究中心 (Centre National d'Études Spatiales, CNES) 提供的轨道产品径向差异约为 1 cm，为卫星顺利完成其科学任务提供重要轨道数据。

近年来，国内外有许多学者针对低轨卫星开展了星载 GNSS 精密定轨研究。美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 与德国航空航天中心 (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR) 联合研制的重力卫星 GRACE 的精密轨道产品经过 SLR 检验，其径向精度优于 1 cm[10]。Montenbruck 等人[11]采用简化动力学和运动学方法针对欧洲空间局发射的 Swarm 卫星进行 GNSS 精密定轨，三维精度分别能达到 1 cm 和 1.7 cm 左右。赵齐乐等人[12−13]利用 PANDA 软件确定的 CHAMP、GRACE、GOCE 的卫星轨道也已经达到厘米级。Wang 等人[14]针对 HY-2C 卫星姿态进行建模，其确定的轨道与 CNES 相比，径向精度为 1.2 cm，三维精度在 3.7 cm 左右。Peng 等人[15]使用星载 BDS 数据对 HY2D 进行精密定轨，三维精度为 5.3 cm，与 GPS 定轨精度相当。目前，针对同一颗卫星搭载主份和备份接收机的对比研究还较少，主份和备份接收机在性能上可能存在差异，导致轨道产品差异需要进一步评估。因此，开展星载 GNSS 主份和备份接收机定轨精度研究具有一定意义。

HY2D 卫星装备有两个 12 通道双频 GNSS 卫星间跟踪仪 (SSTIs)[16]，每个 SSTI 由独立的接收器和天线组成。主要单元 (SSTI-A) 正常运行，而备用单元 (SSTI-B) 用作冗余单元。其中主份接收机只能接收星载 GPS 信号，备份接收机为双模接收机，可以接收 GPS

或 BDS 信号。为测试备份星载 GNSS 接收机性能，2021 年 6 月中旬国家海洋卫星中心进行一次主备份星载 GNSS 接收机切换实验。本文选择测试实验期间的备份接收机星载 GPS 数据以及当月主份接收机 GPS 数据，分别进行精密定轨，研究其观测数据质量及定轨精度，为将来备份接收机的使用提供参考。

2 观测方程

星载 GNSS 接收机接收的基本观测量为双频伪距和相位观测值。双频伪距和相位观测方程可表示为：

$$\rho_{\mathrm{o}}^{\mathrm{p}} = \rho_{\mathrm{c}} + c\delta t_{\mathrm{r}} - c\delta t^{\mathrm{s}} + \delta\rho_{\mathrm{ion}} + \delta\rho_{\mathrm{rel}} + \delta\rho_{\mathrm{wind-up}} + \delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{r}} + \delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{s}} + \varepsilon \quad , \tag{1}$$

$$\rho_{\mathrm{o}}^{\mathrm{L}} = \rho_{\mathrm{c}} + c\delta t - c\delta t^{\mathrm{s}} + \delta\rho_{\mathrm{ion}} + \delta\rho_{\mathrm{rel}} + \delta\rho_{\mathrm{wind-up}} + \delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{r}} + \delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{s}} + b + \varepsilon \quad , \tag{2}$$

其中，$\rho_{\mathrm{o}}^{\mathrm{p}}$ 为低轨卫星相对于 GNSS 卫星的伪距观测值，$\rho_{\mathrm{o}}^{\mathrm{L}}$ 为低轨卫星相对于 GNSS 卫星的相位观测值，ρ_{c} 为低轨卫星相对于GNSS卫星的几何距离，c 为真空中光速，δt 和 δt^{s} 分别为接收机钟差和 GNSS 卫星钟差，$\delta\rho_{\mathrm{ion}}$ 为电离层引起的距离延迟，$\delta\rho_{\mathrm{rel}}$ 为相对论效应引起的距离延迟，$\delta\rho_{\mathrm{wind-up}}$ 为相位缠绕引起的距离变化，$\delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{r}}$ 为低轨卫星相位中心改正，$\delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{s}}$ 为 GNSS 卫星相位中心改正，b 为模糊度，ε 为观测噪声。双频无电离层伪距组合与相位组合形成观测方程表示为：

$$P_3 = \rho_{\mathrm{c}} + c\delta t_{\mathrm{r}} - c\delta t^{\mathrm{s}} + \delta\rho_{\mathrm{rel}} + \delta\rho_{\mathrm{wind-up}} + \delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{r}} + \delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{s}} + \varepsilon \quad , \tag{3}$$

$$L_3 = \rho_{\mathrm{c}} + c\delta t_{\mathrm{r}} - c\delta t^{\mathrm{s}} + \delta\rho_{\mathrm{rel}} + \delta\rho_{\mathrm{wind-up}} + \delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{r}} + \delta\rho_{\mathrm{PCO}}^{\mathrm{s}} + \lambda_3 b_3 + \varepsilon \quad , \tag{4}$$

式中，P_3、L_3 为伪距和载波相位消电离层组合观测值，b_3 为消电离层组合模糊度，此时不再具有整数特性。

3 定轨数据及方法

(1) 星载 GPS 数据

星载 GNSS 接收机数据包括双频 GPS 载波相位和伪距观测值，数据格式为 Rinex3.03，相邻历元时间间隔约为 1 s。观测类型有 C1C、C1P、C2P、L1C、L2P。

(2) GPS 卫星星历

GPS 卫星的精密轨道和钟差产品选用延迟两周左右国际 GNSS 组织提供的 IGS 精密星历，轨道文件中历元间隔为 15 min，钟差文件历元间隔为 30 s。

(3) 力学参数及模型

定轨过程中需要明确所使用的力学模型，对地球非球形摄动力部分，本文采用地球重力场 EGM2008 模型 (120×120 阶)[17]，固体潮和相对论摄动部分则采用 IERS 2010

Conventions[18] 规范给出的标准，太阳光压摄动部分则使用官方发布的 13 板参数和 Box-Wing 模型，海潮摄动部分则采用 FES2004[19] 模型，太阳、月球等第三体引力摄动则使用 JPL DE421 历表计算，大气密度模型采用 DTM94，另外还采用了 RTN 经验力吸收建模不足的经验力。

(4) 参数估计

GPS 每颗卫星每个模糊度弧段解算一个载波相位模糊度和每个历元解算一个接收机钟差，24 h 估算一组初始轨道位置和速度，24 h 估算一个大气阻力参数，6 h 估算一组 T、N 方向经验力参数，12 h 估算一个太阳光压参数。

(5) CNES 的精密轨道

CNES 的精密轨道由国家卫星海洋应用中心提供。

(6) 星载 GNSS 天线相位中心和卫星质心信息

表 1 列出 HY-2D 卫星的主、备份接收机的天线相位中心和卫星质心位置。

表 1　天线相位中心和卫星质心

		X/mm	Y/mm	Z/mm
GNSS 主份天线	L1	347.23	−181.93	−1 377.46
	L2	347.41	−181.00	−1 396.06
GNSS 备份天线	L1	427.40	177.67	−1 378.51
	L2	427.70	177.96	−1 397.31
卫星质心	入轨初期	1326.8	−4.70	6.10

4　数据质量分析

我们选取的 HY2D 卫星主、备份星载 GPS 接收机数据，来自国家卫星海洋应用中心。采用星载 GPS 观测数据定轨，其数据质量直接影响着定轨精度，从而有必要对数据质量开展研究。

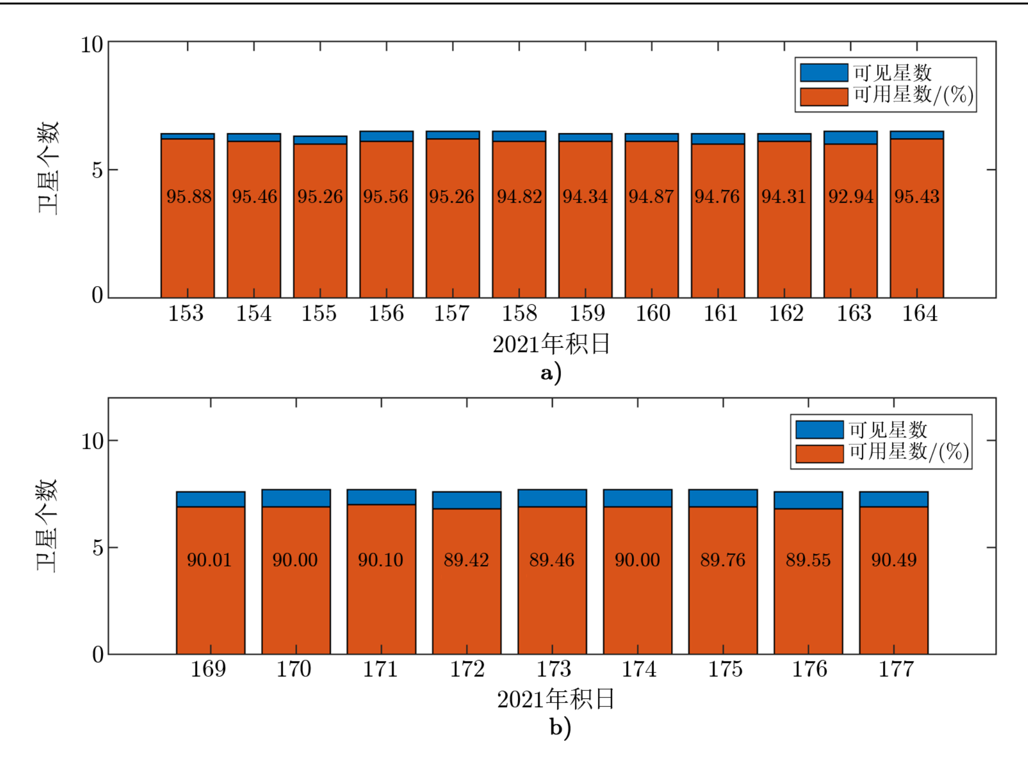
4.1　跟踪能力

图 1 给出主、备份接收机接收到 GPS 卫星和可用卫星个数分布。

从图 1 可以看出，主、备份接收机每个历元跟踪的卫星都超过 6 颗，其中，主份接收机接收 GPS 卫星个数平均值为 6.4，去除数据缺失和单频数据后为 6.1 颗，平均可用率为 94.82%。备份接收机接收 GPS 卫星个数平均值为 7.6 颗，去除数据缺失和单频数据后为 6.9 颗，平均可用率为 89.86%。可见，备份接收机跟踪能力较强，但数据缺失和单频数据占比比主份机高，数据可用率比主份机低。

4.2　多路径效应

对于低轨卫星，多路径效应来源于星载接收机接收到卫星表面反射的 GPS 信号，其大小受卫星表面环境与接收机天线分布等因素的影响。图 2 给出主、备份 GPS 接收机 P 码伪



注：a) 主份接收机；b) 备份接收机。

图 1 单历元观测 GPS 卫星个数统计

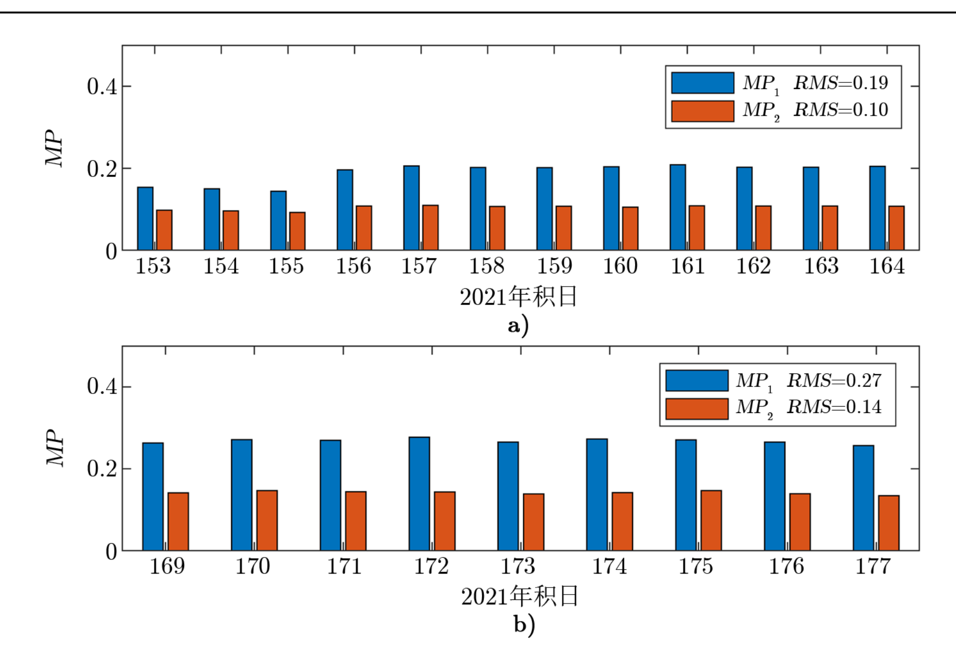
距多路径误差分布图。MP_1 与 MP_2 的多路径效应计算公式为：

$$\begin{aligned} MP_1 &= P_1 - \left(1+\frac{2}{\alpha-1}\right)L_1 + \left(\frac{2}{\alpha-1}\right)L_2 \\ &= M_1 + B_1 - \left(1+\frac{2}{\alpha-1}\right)m_1 + \left(\frac{2}{\alpha-1}\right)m_2 \quad , \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} MP_2 &= P_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right)L_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}-1\right)L_2 \\ &= M_2 + B_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right)m_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}-1\right)m_2 \quad , \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{cases} B_1 = -\left(1+\dfrac{2}{\alpha-1}\right)n_1\lambda_1 + \left(\dfrac{2}{\alpha-1}\right)n_2\lambda_2 \\ B_2 = -\left(\dfrac{2\alpha}{\alpha-1}\right)n_1\lambda_1 + \left(\dfrac{2\alpha}{\alpha-1}-1\right)n_2\lambda_2 \\ \alpha = f_1^2/f_2^2 \end{cases} \quad , \tag{7}$$

式中，P_1、P_2、L_1、L_2 分别表示双频伪距和载波相位观测，M_1、M_2、m_1、m_2 分别表示伪距与载波对应的多路径效应，B_1 和 B_2 为载波相位模糊度的组合。



注：a) 主份接收机；b) 备份接收机。

图 2　P_1 和 P_2 伪距多路径 RMS 统计

可以看出，HY2D 主、备份 GNSS 接收机 P 码多路径误差 MP_1 和 MP_2 的 RMS 平均值分别为 0.19 m、0.10 m 和 0.27 m、0.14 m。统计时段的伪距多路径无明显跳变，说明在这一时期内 HY2D 星载 GPS 接收机周围反射环境比较稳定，只是备份接收机的 P 码多路径误差稍大。

5　定轨结果及精度分析

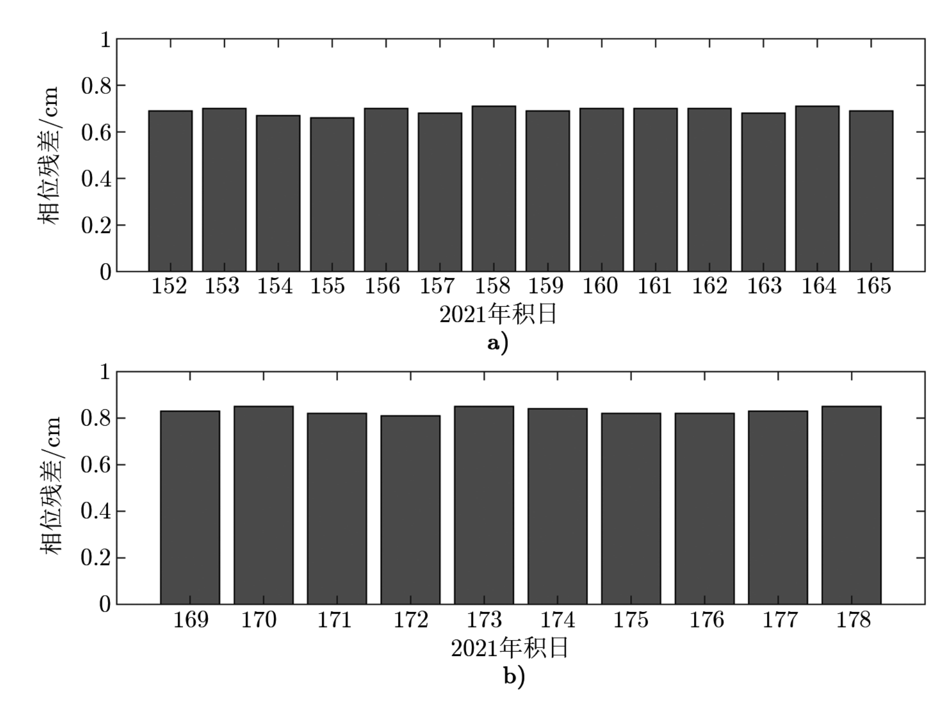
5.1　相位残差

星载 GPS 数据定轨，通常通过定轨相位拟合残差的差异来判断其收敛性。图 3 给出了定轨弧段的拟合相位残差。

从图 3 可以看出，主份星载双频 GNSS 接收机定轨相位残差的平均值为 0.69 cm，备份接收机的相位残差平均值为 0.82 cm。备份接收机相位拟合残差稍大，但也与观测数据测量噪声相当。

5.2　重叠弧段检验

对 HY2D 卫星定轨，弧长设定为 28 h，即 GPS 时第 1 天 22 时至第 3 天 2 时，因此两个定轨弧段有 4 h 的轨道重叠部分。这两条轨道是通过两次定轨计算得到，所涉及的观测数据与解算参数不完全相同，两者符合程度可以粗略地反映轨道结果精度，是评估轨道精度重要指标之一。对于 2021 年 6 月 1 日 22 时－6 月 3 日 2 时和 6 月 2 日 22 时－6 月 4 日 2 时



注：a) 主份接收机；b) 备份接收机。

图 3 相位拟合残差统计

的两段数据定轨，重叠时段为 6 月 2 日 22 时—6 月 3 日 2 时。图 4 为 2021 年 6 月 2 日 22 时—6 月 3 日 2 时主份接收机和 2021 年 6 月 18 日 22 时—6 月 19日 2 时备份接收机重叠弧段差异时间序列。

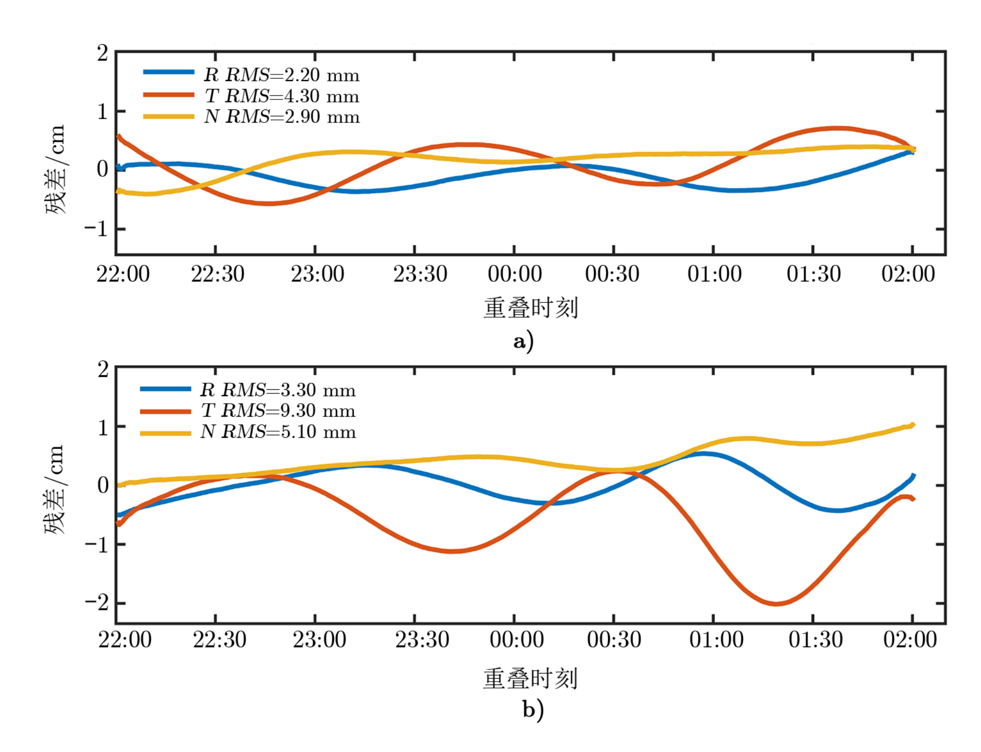
从图 4 可以看出，主、备份接收机定轨弧段重叠差异在径向、切向及法向三个方向残差分布较为稳定，没有出现大的周期信号的波动，表明星载主、备份 GNSS 接收机观测数据更准确，且定轨过程中采用的动力学模型和采用的定轨方法合理。对于图 4 中选定弧段，其主份和备份接收机重叠弧段差异 RMS 在径向分别为 0.2 cm、和 0.3 cm，三维位置差异 RMS 分别为 0.6 cm 和 1.7 cm。

其他弧段与图 4 类似，下面用柱状图形式给出结果 (见图 5)。

可以看出，主份和备份接收机重叠弧段差异 RMS 平均值在径向、切向、法向上分别为 0.3 cm、0.8 cm、0.4 cm 和 0.3 cm、0.9 cm、0.9 cm，三维位置差异 RMS 分别为 1.1 cm 和 1.4 cm，备份接收机差异稍大。

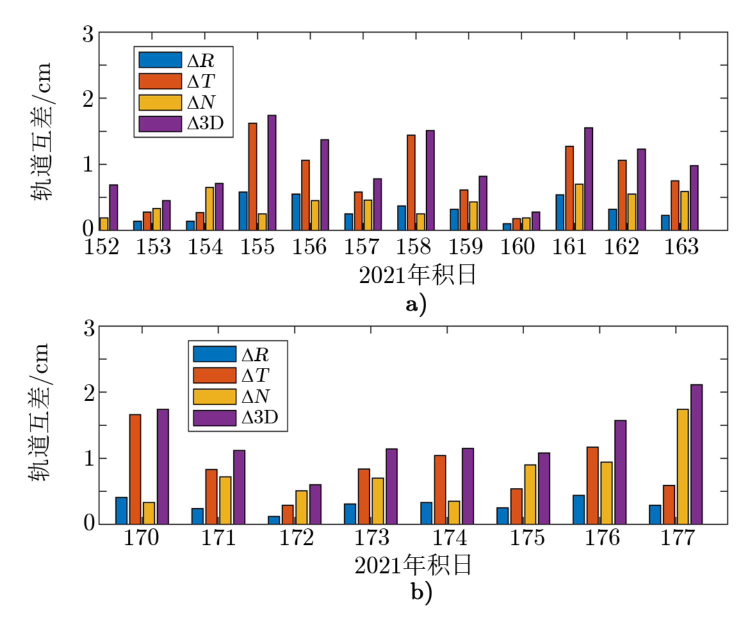
5.3 轨道互比检验

与其他精密轨道产品进行比较是检验轨道精度的重要手段。本文选择国家卫星海洋应用中心提供的法国 CNES 精密事后轨道产品作为检验轨道，研究本文定轨精度。利用 2021 年 6 月 1 日和 6 月 19 日两天的星载主、备份接收机数据定轨结果与 CNES 结果，计算出他们在 R、T、N 方向的差异，如图 6 所示。



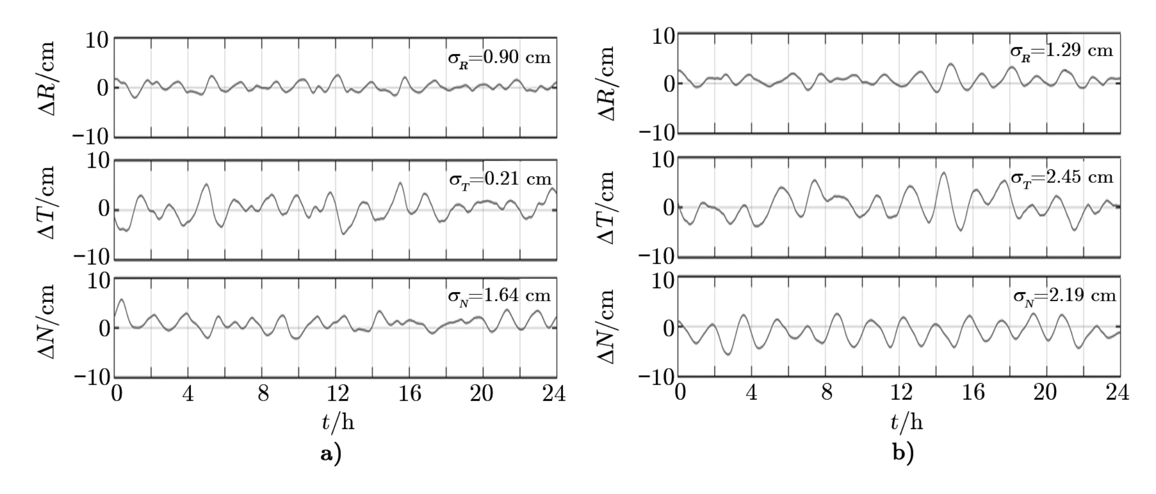
注：a) 主份接收机，2021 年 6 月 2 日；b) 备份接收机，2021 年 6 月 18 日。

图 4　相位拟合残差统计



注：a) 主份接收机；b) 备份接收机。

图 5　重叠弧段轨道差异统计图



注：a) 主份接收机，2021 年 6 月 1 日；b) 备份接收机，2021 年 6 月 19 日。

图 6 与 CNES 轨道结果单天差异

如果将 CNES 计算出的精密轨道作为标准轨道，则 2021 年 6 月 1 日和 19 日主、备份接收机确定的轨道与标准轨道在径向的差异分别为 0.90 cm 和 1.29 cm。

其他时段差异曲线与图 6 类似。表 2 用列表形式给出主、备接收机定轨结果与 CNES 结果之间差异统计。

表 2 主、备接收机定轨结果与 CNES 结果之间差异

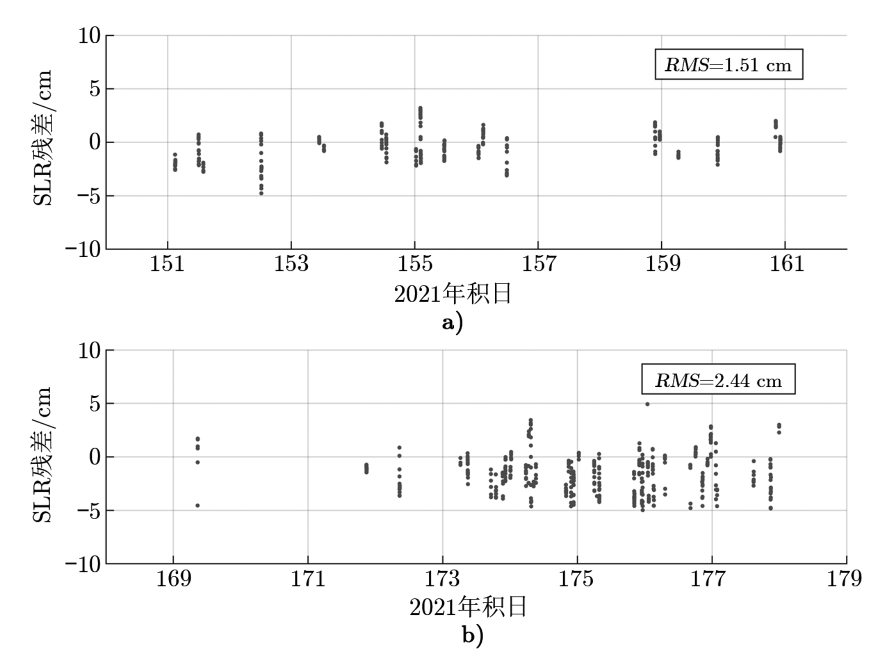
m

	日期	RMS_R	RMS_T	RMS_N	RMS_{3D}		日期	RMS_R	RMS_T	RMS_N	RMS_{3D}
	1	0.0090	0.0210	0.0164	0.0282		13	0.0079	0.0193	0.0129	0.0245
	2	0.0083	0.0179	0.0127	0.0235		14	0.0066	0.0157	0.0204	0.0265
	3	0.0108	0.0230	0.0123	0.0283						
	4	0.0085	0.0200	0.0108	0.0243		19	0.0129	0.0245	0.0219	0.0353
主	5	0.0091	0.0201	0.0109	0.0246		20	0.0139	0.0372	0.0269	0.0480
份	6	0.0066	0.0332	0.0115	0.0358	备	21	0.0105	0.0211	0.0303	0.0384
接	7	0.0082	0.0201	0.0138	0.0257	份	22	0.0117	0.0195	0.0225	0.0320
收	8	0.0062	0.0149	0.0178	0.0240	接	23	0.0120	0.0209	0.0149	0.0283
机	9	0.0078	0.0255	0.0164	0.0313	收	24	0.0144	0.0279	0.0148	0.0347
	10	0.0071	0.0163	0.0139	0.0226	机	25	0.0106	0.0230	0.0178	0.0310
	11	0.0094	0.0215	0.0156	0.0282		26	0.0103	0.0189	0.0114	0.0244
	12	0.0087	0.0246	0.0112	0.0284		27	0.0140	0.0227	0.0201	0.0334

由表 2 可知，主、备份接收机定轨结果与 CNES 提供的标准轨道差异 RMS 平均值，在径向、切向、法向上分别为 0.8 cm、2.1 cm、1.4 cm 和 1.2 cm、2.4 cm、2.0 cm，三维位置差异分别为 2.7 cm 和 3.4 cm；备份接收机差异稍大。

5.4 SLR 检验轨道精度

SLR 是检验卫星定轨结果精度的重要技术之一，检验结果是 SLR 直接测得的站星距与定轨结果计算得到的站星距之差，该差值反应了轨道在测站至卫星方向上的精度。当观测接近天顶方向时，其差值近似体现卫星在径向上误差。由于高仰角的 SLR 观测数据很少，将截止高度角设为 20°，以 15 cm 为阈值对残差进行异常值探测，再对剩余残差序列以 3 倍中误差进一步剔除，得到残差序列分布。图 7 给出 SLR 国际核心站 (7090、7105、7810、7839、7840、7941、7119、7501) 残差序列图。



注：a) 主份接收机；b) 备份接收机。

图 7　与 CNES 轨道结果单天差异

可以看出，用 SLR 检验的 HY2D 卫星主、备份接收机数据计算的轨道，在测距方向的残差 RMS 分别为 1.51 cm 和 2.44 cm。由于 SLR 检验中采用了多项模型改正，模型修正误差在 1~2 cm 之间，表明利用 HY2D 卫星主、备份双频 GNSS 接收机，可以实现厘米级定轨精度。

6 结　论

采用 HY2D 卫星 2021 年 6 月 1－14 日和 6 月 19－27 日星载 GPS 主、备份接收机数据，我们从观测数据质量、轨道重叠、轨道互比和 SLR 检验等多角度评定定轨结果精度，主要得出两点结论。

(1) 主份星载双频 GNSS 接收机接收 GPS 卫星个数平均值为 6.4，略小于备份接收机接

收的 7.6，主份与备份接收机跟踪能力接近。主份 GPS 接收机 P 码多路径误差小于备份接收机，说明主份 GPS 接收机周围反射环境较稳定，受干扰小。

(2) 主份星载双频 GNSS 接收机定轨相位残差平均值为 0.69 cm，备份接收机相位残差平均值为 0.82 cm。主份和备份接收机重叠弧段差异 RMS 在径向分别为 0.2 cm 和 0.3 cm，三维位置差异分别为 0.6 cm 和 1.7 cm。主、备份接收机定轨结果与法国 CNES 提供的标准轨道差异 RMS 平均值在径向、切向、法向上分别为 0.8 cm、2.1 cm、1.4 cm 和 1.2 cm、2.4 cm、2.0 cm，三维位置差异分别为 2.7 cm 和 3.4 cm。SLR 检核结果显示主、备份接收机轨道径向精度约为 1.51 cm 和 2.44 cm，表明主、备份接收机都可以实现 HY2D 厘米级精密定轨。

参考文献：

[1] 蒋兴伟, 何贤强, 林明森, 等. 海洋学报, 2019, 41(10): 113
[2] 蒋兴伟, 林明森, 张有广. 遥感学报, 2016, 20(5): 1185
[3] 蒋兴伟, 王晓慧, 彭海龙, 等. 中国工程科学, 2014, 16(6): 83
[4] 林明森, 何贤强, 贾永君, 等. 海洋学报, 2019, 41(10): 99
[5] 盛传贞, 甘卫军, 赵春梅, 等. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43(2): 219
[6] 周旭华, 王晓慧, 赵罡, 等. 武汉大学学报 (信息科学版), 2015, 40(8): 1000
[7] 朱俊, 王家松, 陈建荣, 等. 宇航学报, 2013, 34(2): 163
[8] 高园园, 赵春梅, 张小强. 导航定位学报, 2016, 4(4): 55
[9] Gao F, Peng B, Zhang Y, et al. Advances in Space Research, 2015, 55: 1394
[10] Kang Z, Tapley B, Bettadpur S, et al. J Geodesy, 2006, 80(6): 322
[11] Montenbruck O, Hackel S, van den Ijssel J, et al. GPS Solut, 2018, 22(3): 79
[12] 赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 等. 大地测量与地球动力学, 2005, 2: 113
[13] 赵齐乐, 施闯, 柳响林, 等. 武汉大学学报 (信息科学版), 2008, 08: 810
[14] Wang Y, Li M, Jiang K, et al. GPS Solut, 2022, 26: 35
[15] Peng H, Zhou C, Zhong S, et al. Remote Sensing, 2022, 14(6): 1390
[16] Guo J, Zhao Q, Guo X, et al. Science China Earth Sciences, 2015, 58(1): 138
[17] Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. Journal of geophysical research: solid earth, 2012, 117: B4
[18] Luzum B, Petit G. Proceedings of the International Astronomical Union, 2012, 10(H16): 227
[19] Lyard F, Lefevre F, Letellier T, et al. Ocean dynamics, 2006, 56: 394
[20] Berger C, Biancale R, Barlier F. Journal of Geodesy, 1998, 72: 161

Research on Precise Orbit Determination Using Onboard GPS Data of HY2D Satellite

TAO En-zhe[1,2], ZHOU Xu-hua[1], XU Ke-xin[1,2], QU-Wei jin[1],
LI Duo-duo[1,2], LI Kai[1]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The quality and orbit determination accuracy of the primary and backup onboard GNSS receivers were studied by using the HY2D satellite's primary and backup GNSS receiver data from June 1 to 14 and June 19 to 27, 2021 based on reduced-dynamic method. The results showed that: (1) The RMS average values of the phase fitting residuals of the main and backup onboard GPS data were 6.9 mm and 8.2 mm, respectively. (2) The radial difference of the main receiver for a 4-hour arc overlap orbit was 0.2 cm, while the three-dimensional position differences was 0.6 cm. The radial difference of the backup receiver was 0.3 cm, while the three-dimensional position difference was 1.7 cm, indicating slightly larger differences from the backup receiver results. (3) The orbit determination accuracies of the primary and backup receivers were verified using precise orbit products provided by CNES, with average radial differences of 0.8 cm and 1.2 cm respectively. (4) The orbit determination accuracies of the primary and backup receivers were also verified using observation data from global SLR core stations with elevation angles greater than 20°, with the RMS range residuals of 1.51 cm and 2.44 cm. It can be seen that the main and backup dual-frequency GNSS receivers carried by the HY2D satellite can meet the satellite's centimeter-level radial orbit determination requirements.

Key words: HY2D satellite; GPS; primary receiver; backup receiver; precise orbit determination